

# シングルステップMOVPE法によるS3型赤色半導体レーザーに関する研究

著者	穴山 親志
号	2633
発行年	2000
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7906">http://hdl.handle.net/10097/7906</a>

氏 名	あな やま ちか し 穴 山 親 志
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成 13 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	シングルステップ MOVPE 法による S <sup>3</sup> 型赤色半導体レーザに関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 坪内 和夫
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 坪内 和夫 東北大学教授 大見 忠弘 東北大学教授 大野 英男

## 論 文 内 容 要 旨

インターネットの爆発的な普及に伴うネットワークの高度化により、個人ベースで扱う情報量は確実に増加し続けている。この中でマルチメディア産業の一端を担うリムーバブル型記憶装置も順調に市場が拡大し続けており、多種類の方式が競合し激しい競争が展開されている。リムーバブル型記憶装置の中でも、DVD 等の光を利用する大容量型の光ディスク装置は、光源として AlGaInP 系の赤色半導体レーザ素子を用いており、装置の大容量化、高速化、そして低価格化のために、レーザ素子の短波長化、高出力化、そしてビーム特性の改善が要求されている。本論文は、MOVPE 法による AlGaInP 系結晶成長技術の性質を調べて素子化に有効な成長技術を検討したとともに、高光出力と高信頼性を確保した上で良好なビーム特性を実現しうる MOVPE 一回成長型の新しい赤色レーザ素子構造を提案し、その素子特性が実用レベルであることを示したもので、全文 5 章からなる。

### 第 1 章 序論

本章では、本論文の背景とニーズを中心に論じている。将来の通信速度から考えた光ディスク記憶装置市場の将来予測を試み、赤色半導体レーザなどの可視光レーザを用いる光ディスクの市場が、今後 10 年以上魅力的な市場として存続できることを予想した。また、書き込み型光ディスク装置に使用される半導体レーザに要求される仕様を述べ、良好なビーム特性を達成することで光ディスク装置の光ヘッドを簡略化できる利点があることを説明するとともに、本研究で目指した素子特性を達成することの意義を明らかにした。そして、AlGaInP 系の赤色可視光レーザ素子に関わる従来技術を述べ、その問題点と、目指すべき素子構造が少なくとも実屈折率構造であることを論じた。

## 第2章 MOVPE 法による AlGaInP 系材料の積層構造成長

本章では均一性と再現性のよい成長層構造を得るための研究について述べた。赤色レーザの素子開発には、大量生産性と高性能化の両者を両立させる新しい結晶成長技術の開発が必要である。大量生産のためには、均一性と再現性のよい成長層構造を得ることが必要であり、このために、良好な均一性の AlGaInP 結晶成長を可能にし、再現性に優れ成長形状が安定であるような nonplanar 基板上の成長技術を選択した。また、レーザの活性層も、設計自由度が高く均一性の高い構造を提案した。

まず均一性と再現性のよい成長層構造を得るために、MOVPE 装置として流量制御された多数のハニカム状インジェクタを有する装置を用い、AlGaInP に必要な 700℃ 付近の高温成長においても、十分な膜厚均一性を得ることが可能となった。

次に、nonplanar 基板上の成長としては最も単純な形状を有する、段差基板上の (411)A ファセット成長について調べた。まず、段差基板の段差高さの均一性と再現性は約 1% 程度と十分なレベルであることを確認し、次にファセット成長実験によって、(411)A 面は成長で現れる安定面であり、量子井戸成長に有利であること、そして段差基板の斜面が多少ばらついたとしても、(411)A 面が成長面として現れるために、最終的には成長形状が自然に安定化することを示した。以上より AlGaInP 成長で (411)A ファセット成長は、nonplanar 基板上の成長としては、均一性や再現性が高く MQW 構造成長に有利であり、素子応用にも有用であることがわかった。

設計自由度が高い活性層構造を得るために、歪量と波長を独立に制御できる GaAs 基板上の歪 GaInAsP/AlGaInP 量子井戸について調べた。As 組成の少ない GaInAsP では、AlGaInP の 700℃ 以上の高い成長温度にも耐え、2 インチウエハ内での均一性も  $\pm 1\text{nm}$  程度と十分高いことが確認できた。

## 第3章 AlGaInP への不純物ドーピング

本章では赤色レーザの高性能化のために必要なドーピングに関連した技術について論じた。このためには、結晶性劣化の原因と考えられる deep level に対して調べるとともに、この結晶系の不純物ドーピングの基板面方位依存性を調べ、有利な成長条件や構造条件を見い出した。また、AlGaInP 系赤色レーザの弱点であった電流ブロック層の作製方法として新しい方法を開発した。

まず結晶性の高品質化のために、AlGaInP 系で非発光性再結合中心となりうる Deep level について調べ、mid-gap にある準位が非発光性の再結合中心として働き、発光効率を劣化させる原因になることを、DLTS 法を用いて明らかにした。またダブルヘテロ構造では AlGaInP クラッドの結晶性が界面再結合を通して発光効率に反映することを示した。そしてその Deep level が酸素に依存した欠陥であることを、MOVPE 成長中の酸素ドーピングによって示し、結晶中に酸素濃度を低減できる結晶成長法が必要であることを明らかにした。

次に、nonplanar 基板上の成長表面には種々の異なる面方位表面が現れるので、MOVPE 成長で不純物ドーピングの面方位依存性を、(100)面から(111)A や(111)B に渡る面方位で系統的に調べた。調べた不純物は、Zn, Mg, Se, Si, 酸素である。p 型不純物である Zn は、(100)面から(311)A 面にかけて取り込み効率が一桁以上増加し、逆に n 型不純物の Se は、(100)から(311)A にかけて一桁近く取り込みが減少し、そして n 型不純物の Si の取り込みは、面方位に依存しない結果であった。また、酸素については、Se と比較的似た依存性を示し、(100)から(311)A にかけて一桁以上取り込みが減少し、それに付随する deep level は 2 桁近く減少することを明らかにした。これら不純物取り込みの面方位依存性は、揮発性の高い不純物が結晶表面に取り込まれる時に、基板面方位に依存して結合ボンド数が増加することによって、その取り込み安定性が増加する定性的モデルで説明できることも示した。以上の不純物取り込みの基板面方位依存性と、AlGaInP 成長では Zn の高ドーピングと deep level 密度の低減が求められることを考え合わせると、(311)A~(411)A 付近の面方位を用いることが、光学的な結晶性改善に有利であることを明らかにした。

次に、不純物ドーピングの基板面方位取り込み依存が MOVPE 成長で顕著であることを利用して、AlGaInP で nonplanar 基板上でラテラル pn 接合が作製できることを、Zn と Se の同時ドーピングによって明らかとした。また、不純物の同時ドーピングによって、結晶性が悪化しないことも示した。また、Zn と Se の交互積層構造による交互ドーピングでも、同時ドーピングと同様にラテラル pn 接合が得られ、抵抗率も悪化しないことを確認した。以上より、不純物の面方位取り込みを利用して作製するラテラル pn 接合は、素子構造設計に適切に取り入れれば、電流ブロック層として十分利用可能な技術であることを示した。

#### 第4章 S<sup>3</sup> (Self-aligned Stepped Substrate) レーザ

本章では、結晶成長技術の研究で得られた知見を基にして、新しい素子構造レーザを開発し、その特性が良好であることを述べた。

高出力赤色レーザの第一世代の波長域である 685nm 帯の新構造レーザとして、斜面発光型の S<sup>3</sup> レーザを提案した。その素子構造を図 1 に示す。このレーザは主要技術として、(411)A ファセット成長による屈曲活性層構造作製技術と、交互ドーピングによる電流ブロック層形成技術の二者を用いることで、MOVPE 一回の成長プロセスで作製できる簡単さと、良好なビーム特性を実現するのに必要となる実屈折率ガイド構造と狭ストライプ幅を同時に実現した。ビーム特性については、非点隔差が 1μm 以下、ビームアスペクト比も 1.3 と、従来に比べて大幅に特性を改善し、簡略化された光学系をもつ光ディスク装置用光源として十分な特性が得られた。また、I-L 特性についても、低閾値電流と高微分効率、そして高特性温度が得られ、従来の 2/3~1/2 程度の大幅な低消費電力化に成功した。さらに、70℃ 35mW で 1500 時間以上の高信頼性があり、簡略化された光学系をもつ光デ

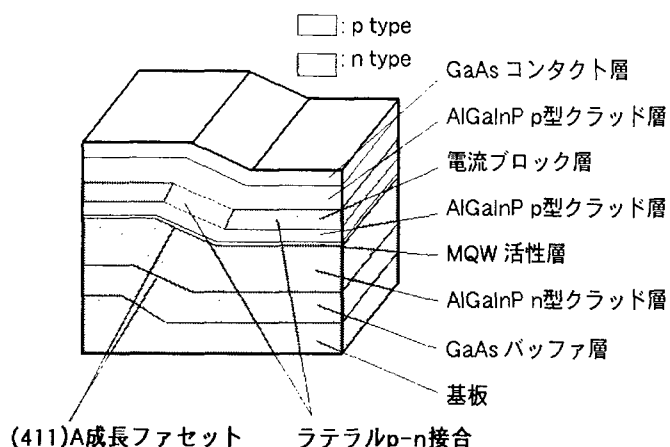


図1 S<sup>3</sup> (self-aligned stepped substrate) レーザ

ディスク装置用光源として実用的に用いられるような総合特性を実現できた。高出力赤色レーザの第二世代の波長域である 660nm 帯への応用では、p 型クラッド層の濃度や共振器長、そして電流ブロック層と活性層間の p 型クラッド層厚などの設計パラメータを最適化することによって、70℃70mW (パルス) の要求されている十分な出力で、1000 時間以上の実用レベルの特性が得られることを示した。

また、S<sup>3</sup> レーザの特徴を活かす設計を行えば、室温で 5mA 以下の低閾値や、200K 以上の高特性温度、そしてアスペクト比がほぼ 1 の真円遠視野像などの、特徴ある特性が実現できることを示した。

## 第 5 章 結論

本章では、第 4 章までの研究成果をまとめて結論とした。nonplanar 基板上の MOVPE 成長技術を用いた実屈折率ガイド構造の開発に研究ターゲットを絞り、AlGaInP 系の MOVPE 結晶成長技術を調べて、主に (411)A ファセット形成技術とラテラル pn 接合形成技術が素子化に有効であることを示した。そしてこれらの成長技術をベースとして新しい素子構造 (S<sup>3</sup> レーザ, Self-aligned Stepped Substrate Laser) を提案し、この素子が、簡略な光学系を有する光ディスク装置用途の光源として十分な特性を有しており、685nm 波長帯では実用化を達成し、660nm 帯でも実用化可能なレベルの特性が得られたことを示した。

# 論文審査結果の要旨

21 世紀の IT (情報技術) 社会ではネットワークの高度化により個人ベースで扱う情報量も増加し、マルチメディアの一端を担う光ディスク関連産業も順調に市場が拡大する見込みである。最近の大容量型光ディスク記憶装置は、その光源に AlGaInP 系の赤色半導体レーザ素子を用いており、短波長、高光出力、さらに良好なビーム特性等の仕様が要求されている。本論文は、MOVPE 法による AlGaInP 系の結晶成長として、(100)面 GaAs 基板上にストライプ形状の(411)面段差部を周期的に設けることにより、一回の成長で(100)面には n 形、(411)面には p 形領域 AlGaInP を成膜する新たな成長技術を開発し、電流閉じ込めと実屈折率光閉じ込めを同時に実現する事を可能にすることにより、高光出力と良好なビーム特性を両立できる MOVPE 一回成長型の新型赤色レーザ素子構造を開発した成果をまとめたものであり、全文 5 章からなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、MOVPE 法による AlGaInP 系材料の積層構造成長について述べている。赤色レーザの開発には大量生産性への対応が必須であり、均一性と再現性を高める必要がある。このために先ずガス導入法を工夫した MOVPE 装置を用い、均一性の高い AlGaInP 結晶成長を可能にした。また、設計自由度の高い GaInAsP 歪 MQW(Multi-Quantum Well)活性層構造も提案した。さらに、ノンプレーナ基板上の MOVPE 成長技術として、段差基板上の(411)A ファセット成長技術を解析し、ファセット成長形状が安定で再現性に優れていることを見出し、この技術が素子化に有望であることを示した。

第 3 章では、素子の高性能化に必要な AlGaInP への不純物ドーピング技術について述べている。AlGaInP の深い準位を DLTS 法で解析し、発光特性改善に酸素不純物の低減が必要であることを示すとともに、AlGaInP における不純物ドーピングの基板面方位依存性から、(411)A 付近の面方位を用いることが、酸素不純物低減と p 型不純物濃度増加に有利であることを示した。さらに、不純物取り込みの基板面方位依存性を利用して、ノンプレーナ基板上の AlGaInP 結晶成長で、p 型と n 型不純物の同時ドーピング又は交互ドーピングにより、ラテラル pn 接合が形成できることを示し、結晶性も良好であることを明らかにした。

第 4 章では、新しい素子構造として S<sup>3</sup>レーザ ( Self-aligned Stepped Substrate Laser )を開発し、その特性を示した。このレーザは主要技術として (411)A ファセット成長技術とラテラル pn 接合形成技術の二者を用いており、MOVPE 一回成長の簡易なプロセスで作製できる実屈折率ガイド構造である。685 nm の波長帯では、アスペクト比 1.3 の良好なビーム特性により、簡略化光学系をもつ光ディスク装置用光源として実用的に用いられる総合特性を実現できた。これは、660 nm 帯において、書き込み型 DVD 装置に必要な諸特性を実現し得る赤色半導体レーザの実用化レベルの特性を示したもので重要な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、AlGaInP 系の MOVPE 成長技術について研究し、ノンプレーナ基板上の新しい成長技術を用いて、高光出力でほぼ円形に近い良好なビーム特性を有する実用レベルの新型レーザ素子構造を開発したものであり、半導体電子工学、半導体レーザ工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。